

УДК 624.012.46

С.В.БУТЕНКО, А.Ф.ПУГАЧЕВ, кандидаты техн. наук
Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры

РАБОТА КОНСТРУКЦИЙ С ЛОКАЛЬНЫМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Рассматриваются особенности работы локально предварительно напряженных конструкций при действии статических и динамических нагрузок и методы решения практических задач.

При осуществлении локального предварительного напряжения (ЛПН) железобетонных и сталежелезобетонных конструкций в напрягаемой арматуре, вследствие ее определенной жесткости, кроме поперечных и продольной растягивающей сил возникают также изгибающие моменты. Как показывают расчеты и данные экспериментальных исследований [1], величина этих моментов значительна и напряжения от изгиба могут в несколько раз превышать напряжения от растяжения. В результате этого может существенно снижаться эффективность данного способа предварительного напряжения, существует опасность превышения напряжениями в концевых зонах напрягаемой арматуры при натяжении предельных значений и т.д. Поэтому актуальной является задача построения аппарата точного расчета и оптимизации параметров локального предварительного напряжения. Указанная задача фактически представляет собой задачу о продольно-поперечном изгибе растянутого стержня. Как известно, эта задача является нелинейной, поскольку вычисление суммарного изгибающего момента осложняется тем, что он может быть подсчитан только при известном прогибе (стрелке натяжения) y , который, в свою очередь, зависит от величины этого момента. Поэтому разрешающее уравнение может быть решено только приближенными или численными методами. Для этой цели может быть использован, например, метод дихотомии (бисекции), часто применяемый для численного решения трансцендентных и других нелинейных уравнений.

Для трех возможных схем осуществления ЛПН (жесткой, полужесткой и шарнирной) дифференциальное уравнение продольно-поперечного изгиба напрягаемого арматурного стержня имеет различные граничные условия и, соответственно, различные формулы, алгоритмы и программы численной реализации.

После осуществления 1-й стадии ЛПН (натяжение арматуры) необходимо определить потери предварительного напряжения с учетом

специфики рассматриваемого метода (ослабление натяжения в арматуре при деформациях выгиба, обусловленных определенной податливостью самой усиливаемой конструкции, возможное локальное раздробление бетона в месте выхода арматуры в паз, деформации фиксирующих устройств и т.д.).

На 2-й стадии ЛПН происходит передача усилий от напрягаемой арматуры (с учетом потерь) на конструкцию с помощью специальных фиксирующих устройств. Эти усилия для балочной конструкции в общем случае имеют три основных составляющих: продольное усилие обжатия, поперечная сила (силы) в местах фиксирующих устройств и концевые изгибающие моменты, знак и величина которых обусловлены эксцентриситетом между нейтральной (физической) осью конструкции и точкой выхода напрягаемой арматуры в паз. При различных комбинациях и значениях этих усилий может в довольно широких пределах варьироваться НДС напрягаемой конструкции (выгиб, напряжения в бетоне будущих растянутой и сжатой зон и др.). Поэтому актуальной является задача построения расчетного и программного аппарата определения и оптимизации параметров НДС конструкций на 2-й стадии локального предварительного напряжения. Возможно также решение обратной задачи – расчет и оптимизация параметров натяжения арматуры на 1-й стадии ЛПН по заданным параметрам НДС на 2-й стадии.

Для расчета конструкции с ЛПН на стадии эксплуатации при действии статических нагрузок используется программная реализация метода упруго-пластического расчета всех элементов конструкции с учетом физической и геометрической нелинейности.

В последнее время при реконструкции промышленных предприятий и их техническом перевооружении на перекрытиях, рассчитанных на действие статических нагрузок, появляется необходимость установки нового виброактивного оборудования [2]. Одним из эффективных способов усиления конструкций таких зданий, необходимого по требованиям прочности, жесткости и выполнения санитарно-гигиенических норм по ограничению параметров вибрации, является ЛПН существующих конструктивных элементов. Представляет практический интерес также исследование работы ЛПН – конструкций в условиях сейсмических и импульсивных воздействий. Существующие комплексы прикладных программ (МИРАЖ, ЛИРА, SCAD и др.) не дают возможности учета при статических и динамических расчетах особенностей и специфики конструкций с ЛПН (наличие «внутренних» усилий в конструкции и т.д.).

В связи с этим актуальной становится задача разработки методов и

программ расчета конструкций с ЛПН на действие как статических, так и динамических нагрузок, что будет способствовать развитию и совершенствованию методов расчета указанных конструкций, а также расширению сферы их применения.

Первой важной задачей при выполнении динамических расчетов конструкций с ЛПН является определение спектра частот и форм их собственных поперечных колебаний. Известно, что наличие продольных сил в балочных элементах приводит к изменению указанных частот. При этом сжимающая сила уменьшает соответствующие частоты спектра колебаний, а растягивающая – вызывает их увеличение. Кроме того, на частоты колебаний будут оказывать влияние поперечные силы, приложенные в местах фиксирующих устройств. На расчетной схеме балки фиксаторы могут быть учтены в виде упругих промежуточных опор, жесткость которых зависит от параметров напрягаемой арматуры. Расчетной моделью оттянутой напрягаемой арматуры при динамических расчетах в этом случае будет, очевидно, полая нить с кинематическим возбуждением колебаний вследствие вибрации опор (фиксаторов арматуры). Параметры вибрации фиксаторов (частота, амплитуда и т.д.) определяются в результате динамического расчета вынужденных колебаний балки. Решение указанных задач требует разработки соответствующих алгоритмов динамических расчетов на основе методов Бубнова-Галеркина, численного интегрирования Гаусса и др., а также их программной реализации.

Дифференциальное уравнение собственных колебаний балки постоянного сечения, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, при действии постоянной продольной силы N , имеет вид

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \pm N \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где EI – изгибная жесткость балки; N – продольная сила (при сжимающей силе перед ней стоит знак «+», при растягивающей – «-»); m – погонная масса балки.

Форма изгибных колебаний балки по ее длине определяется решением уравнения

$$\frac{d^4 Y}{dx^4} \pm \alpha^2 \frac{d^2 Y}{dx^2} - \lambda^4 Y = 0, \quad (2)$$

которое имеет вид

$$Y(x) = A \cdot \sin S_1 x + B \cdot \cos S_1 x + C \cdot sh S_2 x + D \cdot ch S_2 x, \quad (3)$$

где $\alpha^2 = N / EI$; $\lambda = 4 \sqrt{\frac{m\omega^2}{EI}}$ – характеристическое число; ω – круговая частота собственных поперечных колебаний балки; A, B, C, D – произвольные постоянные, определяемые из условий закрепления опор балки (граничных условий) и условий нормирования (ортогонализации).

Коэффициенты S_1 и S_2 определяются следующим образом:

- при действии сжимающей силы N

$$S_1 = \sqrt{\frac{\alpha^2}{2} + \sqrt{\frac{\alpha^4}{4} + \lambda^4}}, \quad S_2 = \sqrt{-\frac{\alpha^2}{2} + \sqrt{\frac{\alpha^4}{4} + \lambda^4}}; \quad (4)$$

- если сила N растягивает балку, то

$$S_1 = \sqrt{-\frac{\alpha^2}{2} + \sqrt{\frac{\alpha^4}{4} + \lambda^4}}, \quad S_2 = \sqrt{\frac{\alpha^2}{2} + \sqrt{\frac{\alpha^4}{4} + \lambda^4}}. \quad (5)$$

Круговая частота i -го тона собственных колебаний балки определяется по формуле

$$\omega_i = \omega_{0i} \sqrt{1 \pm \frac{N}{N_{kp}}}, \quad (6)$$

где ω_{0i} – круговая частота i -го тона собственных колебаний изгибаемой балки при отсутствии продольной силы; $N_{kp} = \frac{\pi^2 EI}{\ell^2}$ – критическая (Эйлерова) сила; ℓ – расчетный пролет балки.

В формуле для ω_i знак «+» ставится при растяжении, «–» – при сжатии балки.

Значение ω_{0i} определяется из зависимости

$$\omega_{0i} = \gamma_i^2 \sqrt{\frac{EI}{m}} = \frac{\beta_i^2}{\ell^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad (7)$$

где $\gamma_i = \beta_i / \ell$ – корень частотного уравнения, зависящий от условий закрепления концов балки (например, для балки с шарнирными опорами $\beta_i = i\pi$, с жесткими – $\beta_i = (i + 0,5) \cdot \pi$ и т.п.).

К практически важным задачам относится расчет колебаний конструкций с ЛПН (мостов, подкрановых балок и др.) при действии подвижных нагрузок с гармоническими составляющими. Например, ре-

монтажу, восстановлению и усилению мостов в мире уделяется все больше и больше внимания в последние годы. Повреждения (износ) существующих мостов, вызванные увеличивающимися перегрузками и старением материалов, становятся главной проблемой. Количество тяжелых транспортных средств и объем движения транспорта на этих мостах превосходит значения, использованные при их проектировании, в результате чего многие из этих мостов имеют усталостные повреждения и нуждаются в срочном усилении.

Таким образом, технология локального предварительного напряжения является эффективной для усиления конструкций в этих случаях [3, 4]. Основой для динамических расчетов в задачах данного класса и их программной реализации являются уравнение Стокса и метод обобщенных координат Лагранжа (в форме систем дифференциальных или интегральных уравнений). В результате расчетов определяются коэффициенты динамичности, а также значения динамических прогибов и напряжений в сечениях конструкции.

Для решения указанных задач предполагается создание специального программного вычислительного комплекса с современным интерфейсом и различными расчетными модулями, учитывающими особенности и специфику конструкций с ЛПН и его отладка с помощью имеющихся и дополнительно полученных при дальнейших экспериментальных исследованиях данных.

1.Шагин А.Л., Бутенко А.А., Мохаммад али Абуаин. Экспериментальные исследования работы напрягаемых стержней в железобетонных локально обжатых изгибаемых элементах // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. праць. Вип.15. – Харків: ХДТУБА, ХОТБ АБУ, 2001. – С.300-306.

2.Пугачев А.Ф. Расчет и усиление существующих конструкций здания при установке системы центрифуг // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. праць. Вип.15. – Харків: ХДТУБА, ХОТБ АБУ, 2001. – С.65-68.

3.Шагин А.Л., Гриневич Е.А. Усиление балочных конструкций железобетонных мостов // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. праць. Вип.15. – Харків: ХДТУБА, ХОТБ АБУ, 2001. – С.73-78.

4.Miyamoto, A., Motoshita, M., Fujii, M. Strengthening of Composite Girder Bridge by External Prestressing. Joinal of Structural Engineering (JSCE), Vol. 40A, pp. 1104-1114. March 1994.

Получено 20.05.2005